МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 669.187.66.00 DOI 10.12737/12594

Металлизованные железорудные окатыши и повышение эффективности их применения при электроплавке стали в дуговой печи*

Л. Н. Крахт[1], Э. Э. Меркер[2], А. Ю. Кем[3], В. А. Степанов[4]**

[1, 2, 4] Старооскольский технологический институт им. А. А. Угарова, филиал Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», г. Старый Оскол, Российская Федерация

[3]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Impact of using metallized iron ore pellets to increase the efficiency of electric arc furnace***

L.N. Krakht[1], E.E. Merker[2], A.Y. Kem[3], V.A. Stepanov[4]**

[1, 2, 4] Stary Oskol Technological Institute after A.A.Ugarov (NITU "MISiS" branch), Stary Oskol, Russian Federation

[3] Don State Technical University, Russia, Rostov-on-Don, Russian Federation

Цель работы — установить влияние металлургических свойств металлизованных окатышей и способа их подачи в ванну дуговой печи на интенсификацию нагрева и плавления железорудных металлизованных окатышей (ЖМО) в шлакометаллическом расплаве агрегата. Предложен способ подачи окатышей через осевые каналы электродов, позволяющий одновременно с окатышами подавать в зону плавления ЖМО через отверстия в электродах сыпучие добавочные материалы (известь, коксик, окалину и др.). Таким образом обеспечиваются условия полного погружения дуг в образующийся вспененный шлак. Исследовано влияние оксидов железа различного фазового и химического составов на пластические свойства окатышей. Установлено, что инвариантность микроструктуры офлюсованных окатышей, в том числе фазового состава связки, определяется уровнем офлюсования и различием валентных состояний железа. Повышение эффективности плавления ЖМО достигается путем подачи в шлакометаллическую ванну окатышей с улучшенными физико-химическими и технологическими свойствами, а также добавочных материалов через осевые каналы электродов.

Ключевые слова: металлизованные окатыши, свойства, вспененный шлак, эффективность, электроплавка, электрод, дуговая печь.

The work objective is to determine the effect of the metallurgical properties of iron-rich pellets and of the method of their submission to the arc furnace bath on the intensification of the heating and melting of the iron metallized pellets (IMP) in the slag-metal melt unit. A method of supplying pellets through the electrode axial passages that allows, simultaneously with the pellets, feeding supplementary bulk materials (lime, coke fines, scale, etc.) to the IMP melting zone through the holes in the electrodes is offered. Thus, the conditions of the full immersion of the arcs into the formed foaming slag are provided. The effect of iron oxides of various phase and chemical compositions on the plastic properties of pellets is investigated. It is found that the microstructure invariance of fluxed pellets including the bonded phase composition is determined by the level of fluxing and the difference of the iron valent states. Improvement in the efficiency of IMP melting is achieved by feeding pellets with improved physicochemical and technological properties, as well as supplementary materials, into the slag-metal bath through the axial passages of the electrodes.

Keywords: metallized pellets, properties, foamed slag, efficiency, electric smelting, electrode, arc furnace.

Введение. На современном этапе развития электросталеплавильного производства активно применяются технологии электроплавки железорудных металлизованных окатышей (ЖМО) в дуговых печах. При этом серьезное внимание уделяется вопросам достижения высоких технико-экономических показателей, повышения качества металлопродукции и снижения энергоемкости производства [1, 2]. В работах [3, 4] приведены данные по результатам исследований пластических свойств ЖМО при восстановлении, представлены особенности микроструктуры обожженных и метал-

*Работа выполнена в рамках гос. задания №11.63.2014/ИК.

**E-mail: lkrakht@mail.ru, merker@inbox.ru, akem@donstu.ru, Viktor1990_31@mail.ru

*** The research is done within the frame of the government task no. 11.63.2014/IK.

лизованных окатышей. Установлено, что проявляющиеся при восстановлении пластические свойства окатышей определяются в первую очередь их микроструктурой, включающей поровое пространство, и фазовым составом связок.

В этой связи **цель настоящей работы** — установить, каким образом металлургические свойства металлизованных окатышей и способ их подачи в ванну дуговой печи влияют на интенсификацию нагрева и плавления ЖМО в шлакометаллическом расплаве агрегата.

Экспериментальная часть. Исследования проводили на экспериментальной установке [3], позволяющей оценить влияние различных добавок фазообразующих оксидов на пластические свойства ЖМО. В качестве восстановительного газа использовали реформированный газ, содержащий 73,5 % H_2; 16,4 % CO; 6,7 % CO_2; 2,6 % CH_4.

Пластические свойства определяли по величине усадки слоя окатышей в процессе восстановления. Для испытаний отбирали пробу массой 1200 г из окатышей определенного состава (размером 12,5–16; 11,2–12,5 и 8–11,2 мм в количестве 30, 25 и 45 %), размещали ее в реакционной камере и определяли высоту слоя окатышей до восстановления. После чего камеру с окатышами помещали внутрь печи и проводили восстановление при 850 $°C$ в течение 3 часов. Затем с помощью пресс-цилиндра к испытуемой пробе прикладывалась постоянная давящая нагрузка в течение 5 минут. После охлаждения пробы в азоте замеряли высоту слоя восстановленных окатышей.

Усадку слоя определяли измерением в конце испытаний высоты слоя пробы, %:

$$YS = (H_M - H_M^в) \cdot 100 / H_M , \qquad (1)$$

где, H_M $H_M^в$ — высота слоя материала до и после восстановления, мм; YS — усадка слоя при восстановлении, %.

Результаты и их обсуждение. Анализ полученных результатов показал, что уменьшение содержания как основных, так и кислотных оксидов приводит к увеличению усадки слоя окатышей в процессе их восстановления, что согласуется с данными [3].

Исследования [4–6] доказывают, что, рассматривая влияние различных факторов на качество окатышей, необходимо принимать во внимание воздействие всех компонентов химического состава с учетом их взаимосвязей. Инвариантность микроструктуры офлюсованных окатышей (в том числе фазового состава связки) определяется уровнем офлюсования и различием валентных состояний железа (Fe^{3+} или Fe^{2+}) [3]. Один из комплексных показателей, отражающих потребительские свойства офлюсованных окатышей, — модуль микроструктуры Шкодина:

$$M_M = Fe_0 \cdot CaO / (Fe^{2+} \cdot SiO_2), \qquad (2)$$

где Fe_0 — доля общего содержания железа в пробе.

Анализ влияния данного модуля на усадку слоя окатышей в восстановительной атмосфере показал следующее. Повышение доли общего железа, сопровождающееся уменьшением содержания оксидов кремния, способствует улучшению пластических свойств окатышей. Однако увеличение степени офлюсования позволяет их снизить. Таким образом, чем меньше содержание SiO_2, тем больше должна быть основность окатышей. Это объясняется тем, что в процессе окислительного обжига формирование связки протекает преимущественно в системе Fe_2O_3 — CaO — SiO_2 и для упрочнения ферритной связки требуется повышенная основность при низком содержании SiO_2. Но связка из ферритов кальция не гарантирует горячей прочности окатышей, поскольку при восстановлении гематит, находящийся в связке, также восстанавливается, что приводит к разрушению окатышей [3, 6].

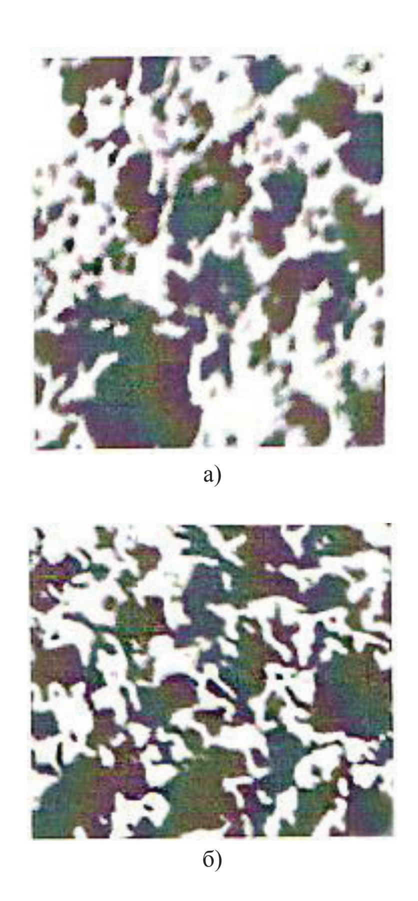
Установлено [4], что структура и фазовый состав обожженных окатышей в значительной степени определяют такие их металлургические свойства, как прочность, набухание, усадка слоя, спекаемость в процессе восстановления.

Прочность железорудного сырья обусловлена, в свою очередь, механическими свойствами связок, образующихся при обжиге. Их фазовый состав и морфология зависят от химического состава используемого в процессе обжига железорудного концентрата, а также вводимых в шихту добавок, газовой фазы. В значительной степени это относится к флюсующим добавкам. Проведены исследования роли состава шихты в формировании структуры и фазового состава обожженных окатышей [4].

Стремление к повышению «горячей» прочности и восстановимости окатышей при одновременном уменьшении их пластических свойств привело к необходимости производства офлюсованных окатышей при переходах $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4$ и $Fe_3O_4 \rightarrow FeO$. Однако дальнейшее восстановление $FeO \rightarrow Fe_{мет}$ сопровождается повышением пластических свойств металлизованного продукта.

Микроструктурный анализ показал, что окатыши из шихты разных составов имеют незначительные отличия. Поверхность их неровная, трещин нет ни на поверхности, ни внутри окатышей (рис. 1). Окисление полное до гематита. Поры в окатышах в основном мелкие, округлой формы, распределены по сечению окатыша равномерно. Однако

образуются и крупные поры (в небольшом количестве в местах крупных включений известняка), распределение их случайное. Наблюдается образование гематитовой связки спекания и силикатной связки — стекла. Окатыши имеют зернистую микроструктуру, однородную по всему сечению. Добавки бентонита и известняка формируют силикатную связку.



а)

б)

Рис. 1. Микроструктура краевой (а) и центральной (б) зон окатыша при 250-кратном увеличении: области белого цвета — гематит, зеленый — силикатная связка (стекло). На части (а) видны остаточные включения бентонита в виде округлых образований с мелкозернистыми выделениями вторичных оксидов, на части (б) — крупные зерна кварца (фиолетовый) и поры (синий)

При определении фазового состава металлизованных окатышей установлено, что среднее содержание металлического железа в них колебалось в пределах 70–77%. Отмечено также присутствие незначительного количества оксидов железа, силикатной связки.

Металлическое железо представлено в виде сплошной сетки по всему сечению окатышей. Детальное изучение микроструктуры показало, что распределение фазовых составляющих по сечению окатышей далеко не равномерное, просматривается тенденция к увеличению количества связки в наружных, периферийных слоях окатыша. Пористость окатыша увеличивается к центру.

Проведенные микроструктурные исследования позволили выявить общие закономерности механизма формирования структуры связки рудной части окатыша. Отмечено, что во всех пробах обожженных окатышей увеличение их общей пористости происходит при добавлении известняка (вследствие его диссоциации).

Таким образом, анализируя связь микроструктуры с характеристиками поведения окатышей в процессе восстановления, необходимо отметить следующее. Оксид алюминия переходит в фазы связки (ферритную и силикатную), тем самым повышая уровень прочности окатышей, снижая их склонность к спеканию, уменьшая усадку и увеличивая восстановимость. Поэтому для получения прочных окатышей, имеющих большую восстановимость, необходимо иметь соотношение оксидов кальция и алюминия в пределах 2–2,5 [3, 4].

Металлографические исследования [5, 7] показали, что после подачи окатышей в ванну дуговой печи на их поверхности образуется гарнисажная корочка (рис. 2). Она может быть как шлаковой, так и шлакометаллической.

Другие зоны в структуре окатыша формируются температурой и длительностью нахождения образца в железоуглеродистом расплаве ванны дуговой печи.

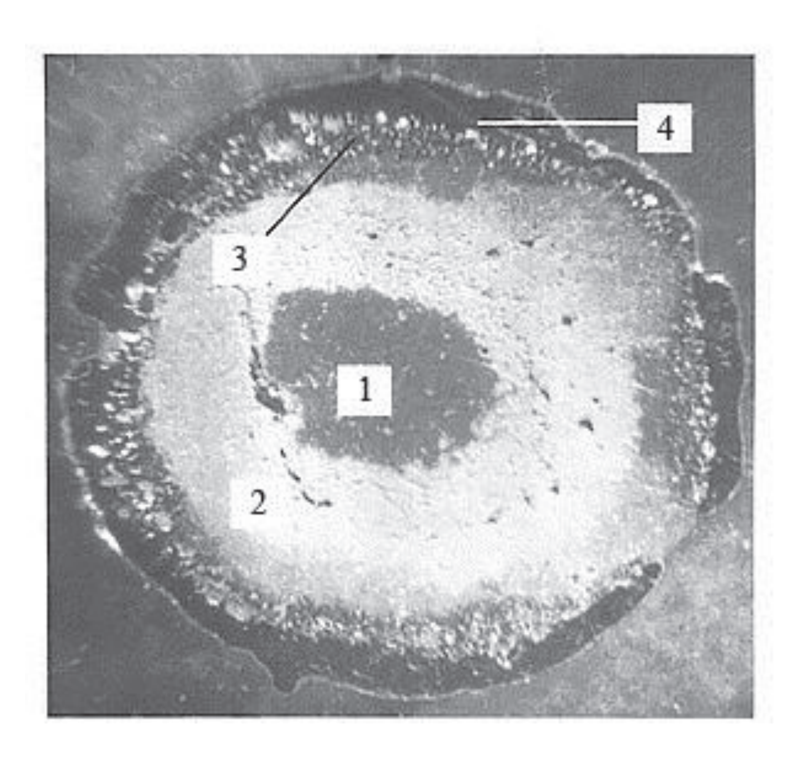


Рис. 2. Особенности (в разрезе) структуры ЖМО при кратковременном погружении его в железоуглеродистый расплав: 1 - центр окатыша; 2 - зона с упрочненной структурой; 3 - промежуточная зона; 4 - гарнисажная корочка на поверхности окатыша

Установлено, что при непрерывной подаче ЖМО в ванну дуговой печи через полые электроды время плавления потока ЖМО в шлако-металлическом расплаве дуговой печи снижается более чем в 1,5 раза [1, 2, 7].

По ходу движения окатышей через осевые каналы электродов в объёме электрической дуги они нагреваются за счёт излучения и тепловой поток, воздействующий на поток окатышей, рассчитывается [1, 5] с использованием обобщённой системы выражений:

$$q_{изл} = \begin{cases} \varepsilon_{пр} \cdot C_0 \cdot [T_\partial / 100]^4 - [T_{ok} / 100]^4 \cdot F_0, \\ где_F_0 = 3 \cdot V_{ok} \cdot \tau_{пад} / (p_{ok} \cdot r_{ok})_при \\ \tau_{пад} = (\sqrt{V_x^2 + 2h \cdot a_2} - V_x) / a_2 \end{cases} \quad (3)$$

где $\varepsilon_{пр}$ – приведённая степень черноты, равная для поверхности окатыша 0,9; C_0 – излучательная способность абсолютно чёрного тела, равная 5,67 Вт/м²*К⁴; T_∂ - температура дуги, принятая при расчётах 5000 К; $F_0 = F_{ok} \cdot n_{ok}$ - тепловая мощность, принимающая поверхностью порции окатышей в объёме дуги, где F_{ok} и n_{ok} - поверхность окатыша и их количество в дуге; V_{ok} - расход окатышей, кг/с; $\tau_{пад}$ – время падения окатыша, с; ρ_{ok} и r_{ok} - плотность (кг/м³) и радиус окатыша, м; V_x - скорость падения окатыша на выходе из отверстия электрода, м/с; h – высота падения окатыша, м; a_2 – ускорение движения окатыша по длине отверстия в электроде, м/с².

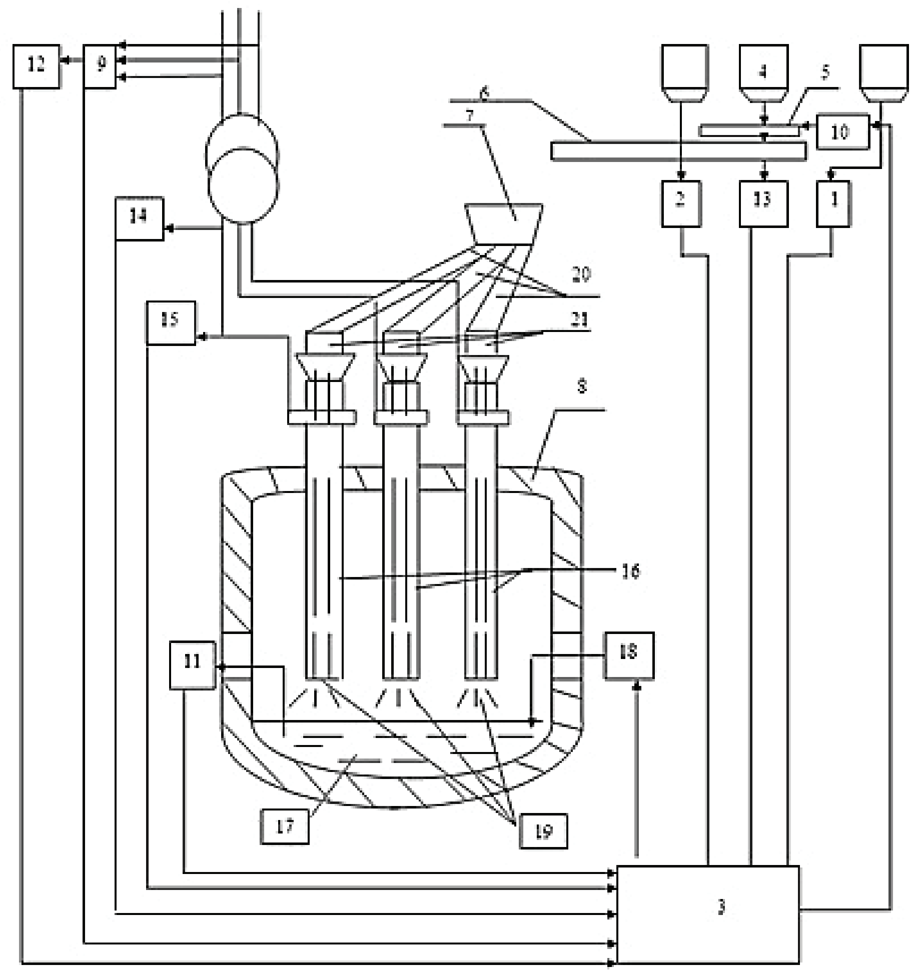


Рис. 3. Схема дуговой печи с системой подачи ЖМО через осевые каналы в электродах и управление ходом электроплавки ЖМО в агрегате:
1 — расход металлошихты на плавку; 2 — датчик расхода сыпучих (известь и др.); 3 — управление ЭВМ; 4 — бункер расхода окатышей в электроды; 5 и 6 — конвейеры для загрузки окатышей и сыпучих материалов; 7 — приемная воронка; 8 — дуговая печь; 9 — датчик потребляемой активной мощности; 10 — исполнительный механизм; 11 — система контроля температуры металла в печи; 12 — датчик потребляемой мощности печи; 13 — сигналы с датчиков расхода окатышей; 14 — датчики тока; 15 — датчики напряжения; 16 — трубчатые (полые) электроды; 17 — металл и шлак в ванне печи; 18 — расчет теплоусвоения ванны ($\Delta q_в$, кВт); 19 — электрические дуги; 20 — гибкие шланги; 21 — воронки-изоляторы на электродах

Повышение эффективности тепловой работы ДСП-150 наблюдается при использовании топливно-кислородных горелок (ТКГ). Результаты обработки опытных данных (более 30 паспортов плавок) свидетельствуют об ускорении процессов плавления ЖМО [3, 7] и улучшении технико-экономических показателей электроплавки стали. Соответствующие данные отражены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты обработки опытных данных работы ДСП-150 с непрерывной загрузкой ЖМО и применения ТКГ для интенсификации процесса

№ п/п	Показатели	Марки стали	
		ШХ15	Углеродистая сталь
1	Время плавки под током, мин	100/85*	95/87
2	Удельный расход кислорода на тонну годного металла, м³/т	14,5/30,2	12,1/30,73
3	Удельный расход углерода на тонну годного металла, кг/т	18/13	7/10,5
4	Удельный расход окатышей на тонну годного металла, кг/т	650/720	640/700
5	Коэффициент использования металлизованного сырья $G_{ок}/G_{лом}$	2,1/2,1	1,3/1,95
6	Удельный расход извести на шлакообразование, кг/т	55/68	51/82,6
7	Энергозатраты на процесс плавки, МДж/т	2482/2111	2152/2000
8	Производительность дуговой печи, т/ч	60,96/75,61	83,5/88,5
*Числитель — работа ДСП без применения ТКГ, знаменатель — с ТКГ			

Из приведенных в таблице данных следует, что использование ТКГ для интенсификации шлакообразования и вспенивания шлака приводит к повышению производительности ДСП. Например, при расходе энергии двух горелок 50–70 кВт · ч/т стали достигается сокращение удельного расхода электроэнергии на 35–50 кВт · ч/т жидкой стали.

При использовании системы подачи ЖМО через трубчатые (полые) электроды ДСП представляется возможным одновременно с окатышами подавать в зону плавления ЖМО сыпучие материалы (известь, коксик, окалину, известняк и др.). Тем самым обеспечивается полное погружение дуг в образующийся вспененный шлак. В этом случае практически вся лучистая энергия от дуг идет на нагрев и плавление окатышей на поверхности металла и шлака в кипящей ванне.

Выводы. Результаты исследования металлографичеческих и физико-химических свойств металлизованных окатышей, а также способ их подачи в ванну дуговой печи позволяют наметить пути интенсификации нагрева и плавления ЖМО в шлакометаллическом расплаве агрегата. При загрузке ЖМО через полые электроды в ванну дуговой печи скорости нагрева и плавления окатышей возрастают в 1,5–2 раза. При этом снижается удельный расход электроэнергии на процесс плавки стали.

Библиографический список

1. Меркер, Э. Э. Электроплавка металлизованных окатышей в дуговой печи / Э. Э. Меркер, Е. А. Черменев. — Старый Оскол : Тонкие наукоемкие технологии, 2015. — 320 с.

2. Меркер, Э. Э. Энергосберегающие условия плавления металлизованных окатышей в ванне дуговой печи / Э. Э. Меркер // Черная металлургия. — 2008. — № 1. — С. 35–39.

3. Результаты исследований пластических свойств окатышей при восстановлении / А. С. Тимофеева [и др.] // Сталь. — 2008. — № 2. — С. 2–3.

4. Микроструктура обожженных и металлизованных окатышей / Л. Н. Крахт // Известия вузов. Черная металлургия. — 2007. — № 10. — С. 7–8.

5. Меркер, Э. Э. Повышение эффективности электроплавки стали путем подачи металлизованного сырья в зону высоких температур через каналы в электродах дуговой печи / Э. Э. Меркер, В. А. Степанов // Черная металлургия. — 2014. — № 1. — С. 41–49.

6. Пузанов, В. П. Структурообразование из мелких материалов с участием жидких фаз / В. П. Пузанов, В. А. Кобелев. — Екатеринбург : Уральский институт металлов, 2001. — 634 с.

7. Меркер, Э. Э. Особенности технологии электроплавки окатышей в дуговой печи / Э. Э. Меркер, А. В. Сазонов, А. А. Гришин // Известия вузов. Черная металлургия. — 2008. — № 2. — С. 21–23.

References

1. Merker, E.E., Chermenev, E.A. Elektroplavka metallizovannykh okatyshey v dugovoy pechi. [Electrosmelting of metallized pellets in arc furnace.] Staryy Oskol: Tonkie naukoemkie tekhnologii, 2015, 320 p. (in Russian).

2. Merker, E.E. Energosberegayushchie usloviya plavleniya metallizovannykh okatyshey v vanne dugovoy pechi. [Energy-saving conditions for melting metallized pellets in the arc furnace bath.] Chernaya metallurgiya, 2008, no. 1, pp. 35–39 (in Russian).

3. Timofeyeva, A.S., et al. Rezul'taty issledovaniy plasticheskikh svoystv okatyshey pri vosstanovlenii. [Results of the research of pellet plastic properties under reduction.] Stal', 2008, no. 2, pp. 2–3 (in Russian).

4. Krakht, L.N., et al. Mikrostruktura obozhzhennykh i metallizovannykh okatyshey. [Microstructure of the fired and metallized pellets.] Izvestia. Ferrous Metallurgy, 2007, no. 10, pp. 7–8 (in Russian).

5. Merker, E.E., Stepanov, V.A. Povyshenie effektivnosti elektroplavki stali putem podachi metallizovannogo syr'ya v zonu vysokikh temperatur cherez kanaly v elektrodakh dugovoy pechi. [Improving the efficiency of steel electric smelting by supplying metallized raw material in the high temperature zone through channels in the arc furnace electrodes.] Chernaya metallurgiya, 2014, no. 1, pp. 41–49 (in Russian).

6. Puzanov, V.P., Kobelev, V.A. Strukturoobrazovanie iz melkikh materialov s uchastiem zhidkikh faz. [Structurization of fine materials with liquid phases.] Ekaterinburg: Ural Institute of Metals, 2001, 634 p. (in Russian).

7. Merker, E.E., Sazonov, A.V., Grishin, A.A. Osobennosti tekhnologii elektroplavki okatyshey v dugovoy pechi. [Technology features of electric smelting of pellets in arc furnace.] Izvestia. Ferrous Metallurgy, 2008, no. 2, pp. 21–23 (in Russian).

Поступила в редакцию 23.04.2015
Сдана в редакцию 23.04.2015
Запланирована в номер 30.06.2015